

# 磁盘记录信号的热磁衰减现象的记录 密度依赖性

姜文红<sup>1</sup>, 田河育也<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学计算机与信息技术学院, 北京 100044 2 日本富士通株式会社)

**摘 要:** 超大容量的外存储设备在计算机网络日新月异的发展过程中变得越来越重要. 而存储容量的增加势必带来由于热衰减现象引起的记录信号衰减的问题. 本文通过计算机仿真与实验, 研究了磁盘介质中记录信号的热磁衰减现象. 文中着重讨论了信号的热磁衰减对记录密度的依赖性, 同时考虑了介质参数对衰减量的影响. 指出垂直磁记录方式是超高密度记录的最适宜方式之一.

**关键词:** 热磁衰减现象; 垂直磁记录方式; 超高密度记录

**中图分类号:** TP333.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 07-1291-03

## Bit Density Dependence of Thermal Relaxation of Recorded Signal on Hard Disk

JIAN G Wen-hong<sup>1</sup>, TAGAW A Ikuya<sup>2</sup>

(1 School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044 China; 2 Fujitsu Ltd Company of Japan)

**Abstract** Ultrahigh-density hard disk drive is needed with the development of Internet but thermal decay is becoming more and more significant with the increasing of recording density. In this paper, thermal relaxation in media was examined by simulation and experiments. Bit density dependence of thermal relaxation of recorded signal was mainly discussed and the influence of media parameters was also considered. We pointed out that perpendicular magnetic recording is one of the most appropriate method at ultrahigh recording density.

**Key words** thermal relaxation; ultrahigh recording density; perpendicular magnetic recording

### 1 引言

随着计算机网络与多媒体技术在全球范围内的迅速发展, 需要高密度大容量的外存储装置. 对磁盘来说, 要实现高记录密度, 同时保证记录介质的高分辨率和较高的信号噪声比, 采取的主要措施之一是减小记录介质中磁性粒子的大小, 这时由热磁衰减现象引起的信号衰减问题已不容忽视, 这是决定磁记录技术记录密度上限的重要因素之一.

作者在利用垂直磁记录方式实现高密度记录的研究中, 采用的磁记录介质为垂直二层膜介质. 由于垂直磁化方式即使记录层较厚, 仍然可以实现高密度记录<sup>[1]</sup>, 因此介质中的实效粒子体积 (从表面观察到的粒子直径与膜厚的乘积) 较大, 由此期望能够缓和热磁衰减的影响. 但同时也有观点认为垂直介质中由热磁衰减引起的磁化衰减较大<sup>[2]</sup>. 由于在直流磁化状态时垂直磁化受到很强的内部反

向磁场的影响, 使抵抗热磁衰减的各向异性能量降低, 由此容易产生记录磁化的衰减, 因此在研究热磁衰减现象时, 有必要仔细考虑在何种记录状态下评价热磁衰减的影响.

本文主要从计算机仿真和实验两方面, 对垂直磁记录方式下由热磁衰减引起的介质信号衰减进行了考察, 并且尝试从中提取出最基本的性质. 特别是着眼于记录密度越高反向磁场越小, 这一垂直磁记录方式本身固有的性质, 进行了探讨. 与本文获北京交通大学论文基金资助水平磁记录方式相反, 垂直磁记录方式线记录密度越高时, 输出信号的衰减量越小. 这点可以由垂直磁记录方式反向磁场的本质特征得到很好的解释.

实验中所使用的读写磁头分别为单磁极写磁头和 MR (磁致电阻) 悬浮型读磁头. 计算机仿真依据二维有限元法, 利用非一致反转模型模拟介质中磁化的状态, 对衰减量的计算应用了指数衰减理论.

### 2 输出信号衰减对记录密度的依赖性

首先,为了掌握垂直磁记录方式下热磁衰减的趋势,假设用单磁极磁头对二层膜介质进行记录的情况下,进行了计算机仿真.计算中的介质参数分别为饱和磁化强度为  $430\text{emu/cm}^3$ ,各向异性场为  $43600\text{e}$ ,矫顽力为  $11000\text{e}$ ,介质厚度为  $100\text{nm}$ ,粒子平均体积为  $70000\text{nm}^3$ ,对各向异性场的分布赋予了高斯分布.计算机仿真依据有限元法,引入非一齐反转的磁化反转模型模拟介质的磁化机制<sup>[3]</sup>.计算机仿真流程如下所示.

首先在没有热磁衰减的影响的情况下,确定要计算的记录密度.在此记录密度下模拟记录过程,求出初始记录的磁化分布.对应这一磁化分布求出介质内各要素点的反向磁场.非一致反转模型中,矫顽力相当于反转磁场大小,从矫顽力中减去上述的反向磁场,得到各点实际的各向异性磁场大小,由此计算出各向异性能量大小  $K_u$ .粒子体积用  $V$ ,绝对温度用  $T$ ,波尔兹曼常数用  $k_B$  表示时,根据公式计算时间常数  $t$ ,

$$t = 10^9 \times \exp(K_u \cdot V / k_B T) \quad (1)$$

然后对应于每个时间间隔  $\Delta t$ ,各要素点上的磁化按指数函数衰减,求出随时间变化的各个时刻的磁化强度,计算公式为  $M(t_i) = M(t_{i-1}) \times \exp[-(t_{i-1} + \Delta t) / t]$  (2)

由于担心磁化在衰减状态下,会破坏自我一致性,因此再一次进行自我一致性的收敛计算,确定随时间变化了的磁化分布<sup>[3]</sup>.

考虑到实际介质中粒子的体积分布同样不可忽视,对式(2)中的粒子体积分布赋予了高斯分布.同时对粒子间的相互作用,将静磁相互作用用平均磁场近似,而没有考虑粒子间的交换相互作用<sup>[4]</sup>.磁头的输出电压依据互感定理计算.

假设粒子为底面直径  $50\text{nm}$  的圆柱体(高度为  $100\text{nm}$ ),体积为  $7 \times 10^4\text{nm}^3$ ,这一数值与 AFM(原子力显微镜)观察到的结果一致.从这一体积换算的  $K_u V / k_B T$  值室温时大约为  $400$ 左右.

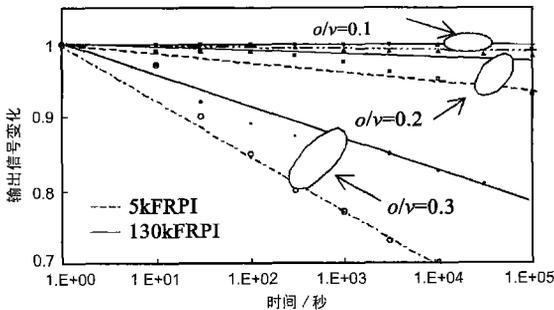


图1 不同记录密度与粒子体积分布时的输出衰减量的计算机仿真结果

经过上述计算机仿真计算出由热磁衰减引起的输出电压随时间的变化结果如图1所示.将粒子体积分布的标

准偏差除以粒子体积的平均值定义为参数  $(\sigma/v)$ ,分别取值为  $0.1, 0.2, 0.3$  当记录密度为  $5\text{kFRPI}$  和  $130\text{kFRPI}$  时,输出电压的变化量既依赖于记录密度,同时又依赖于粒子体积分布,因此当我们讨论热磁衰减现象时,必须综合上述这些因素的影响进行讨论.换言之,输出电压的变化量在这样大的程度上依赖于粒子的体积分布,说明小于平均体积的粒子对全体的衰减量有很大的影响.这一点对介质制作时是十分重要的,应引起充分的重视.

同时从图1中还可以看出,垂直磁记录记录密度越高,衰减量越小.也就是说,对垂直磁记录热磁衰减的测试中,低密度记录状态以及依据 VSM(振动样品测试仪)的直流磁化状态的测试结果,未必能正确反映垂直磁记录在高密度记录状态时的衰减量.这与水平磁化方式在低密度时反向磁场减小,直流磁化状态时最安定的性质正相反.

通过计算机仿真还计算了输出信号衰减量对粒子体积的依赖性.假设粒子体积继续减小,即体积由  $1 \times 10^4\text{nm}^3$  至  $6 \times 10^3\text{nm}^3$  之间变化时,计算结果如图2所示.记录密度为  $130\text{kFRPI}$  粒子体积分布参数  $\sigma/v$  取值为  $0.1$  粒子体积在  $1 \times 10^4\text{nm}^3$  (假设粒子形状为  $100\text{nm}$  高的圆柱,则粒子直径约等于  $1\text{nm}$ ) 至  $6 \times 10^3\text{nm}^3$  (粒子直径约为  $8.7\text{nm}$ ) 之间变化时,经过大约  $105$  秒之后,衰减量由  $5\%$  增大到  $25\%$ .这时  $K_u V / k_B T$  的数值大约为  $57$  至  $34$  即使对于直径约为  $10\text{nm}$  这样小的粒子,也能实现如此程度的衰减量,是因为粒子高度为  $100\text{nm}$  的缘故,从这点上我们可以确认垂直磁记录的优势所在<sup>[1]</sup>.

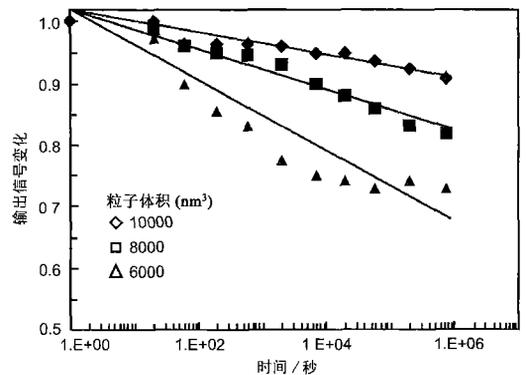


图2 不同粒子体积下输出衰减的计算机仿真结果

为了与计算机仿真结果进行比较进行了实验测试.实验采用读/分离的磁头结构,即利用接触型单磁极磁头写,悬浮型 MR 磁头读,使用

材料	Co-Zr/Nb
膜厚	300nm
道宽	50 $\mu\text{m}$

的介质为二层膜垂直介质.为了避免磁道偏离的影响,使用了道宽幅度很宽的单磁极磁头.写入信号之后,升起单磁极磁头,用 MR 磁头连续测试输出电压的变化.环境温度为室温.测试中使用的二层膜介质各项参数与上述计算机仿真中的参数相同.选择测试样品时,我们另外选择了矫顽力分布  $\Delta H_c, H_c$  大小不同的两种介质.实验中使用的

磁头参数如表 1、介质参数如表 2

表 2

介质		A	B	C
记录层 Co-Cr	M s (cm u/cc)	430	470	500
	厚度 (nm)	100	50	50
	Hc (Oe)	1100	1200	1300
	$\Delta H_c / H_c$	0.61	0.86	0.1

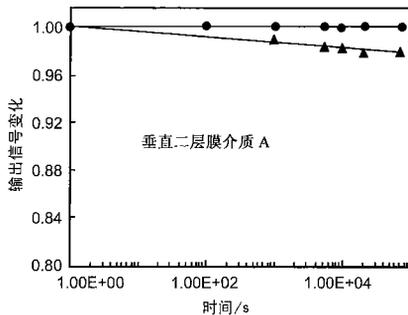


图 3 不同记录密度时输出衰减量的实验结果

测试结果表示于图 3 中。记录密度为 5kFRPI 时，电压减少量很小，正如计算机仿真结果所预测的一样，在 100kFRPI 的高密度下，在实验的测试时间范围内，输出电压无变化。验证了高密度时垂直磁记录热磁衰减的影响很小这一特性。对应图 1 中的电压减小量结果，此处介质的粒子体积分布参数  $\sigma / v$  大约等于 0.1 左右。

### 3 介质磁特性对输出衰减的影响

改变介质的磁特性，对矫顽力分布不同的介质的电压衰减量进行了测试。结果如图 4 所示。低矫顽力分布的介质，输出电压的变化量较小。说明改变介质的参数可以减轻由热磁衰减带来的输出电压减小。这一结果说明不止是矫顽力的绝对值，矫顽力的分布对电压变化也有一定的影响。

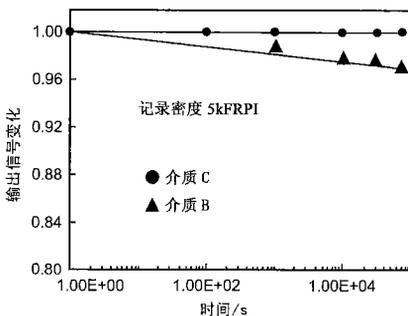


图 4 不同矫顽力分布时输出衰减量的实验结果

其次我们对从市场上买来的水平记录介质进行了同样的测试。仍然使用上述实验所使用的 MR 磁头。测试结果表示于图 5 中。由于介质的磁特性、粒子大小等参数还不明确，不能单纯的只讨论输出电压减小量，但是从测试结果中至少有一点可以确认，就是和上述的垂直磁记录相反，水平磁记录记录密度越高时，输出电压变化量较大。对水平记录介质，通过增大各向异性场等改善措施可以在一定程度上抑制衰减现象，但是对记录密度的依赖性是其本

质特征，因此对水平磁记录在将来高密度的情况下，由热磁衰减引起的电压减小现象有必要给予充分的重视。

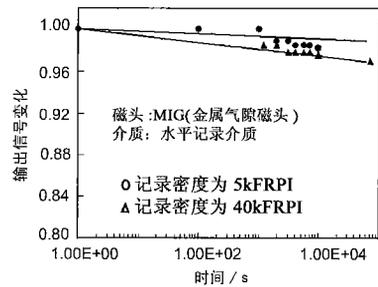


图 5 不同记录密度下水平记录介质的输出衰减

### 4 总结

本文通过计算机仿真与实验测试，考察了垂直磁记录介质中由热磁衰减引起的输出电压的减小现象，结果表明粒子体积分布的影响较大，而且记录密度越高衰减量越小。室温、记录密度为 100kFRPI 时，经过  $10^4$  秒之后实验中测得的衰减量为 (2~4)%，衰减量非常小。垂直磁记录所适用的数百 kFRPI 的高密度记录的情况下，结合各种信号处理方式，热磁衰减的影响将会很小<sup>[5]</sup>。

将来的超高密度记录，将由直径 10nm 左右的粒子构成超微细粒子介质，期望通过本研究的结果，即减小粒子体积分布幅度、介质矫顽力分布等措施，使热磁衰减现象得到抑制，从而实现低噪声垂直介质。进一步的研究是对包含交换相互作用在内的粒子间相互作用进行正确的定量分析。

### 参考文献:

- [1] S Iwasaki, Y Nakamura. An analysis for the magnetization mode for high density magnetic recording [J]. IEEE Trans Magn, 1977, 13(5): 1272-1277.
- [2] W Cain, A Payne, M Baldwin, R Hempstead. Challenges in the practical implementation of perpendicular magnetic recording [J]. IEEE Trans Magn, 1996, 32(1): 97-102.
- [3] Y Nakamura, I Tagawa. An analysis of perpendicular magnetic recording using a newly developed 2D-FEM combined with a medium magnetization mode [J]. IEEE Trans Magn, 1989, 25(5): 4159-4161.
- [4] I Tagawa, A Takeo, Y Nakamura. Inteparticle interaction field in magnetic recording media [J]. JM agn Soc Jpn, 1994, 18(1): 95-98 (in Japanese).
- [5] Shimatsu T, Uwazumu H, Mumaoka H, Nakamura Y. Thermal stability in perpendicular recording media [J]. Journal of magnetism and magnetic materials, 2001, 235(1-3): 273-280.

### 作者简介:

姜文红 女，1968年出生于长春，现为北京交通大学计算机与信息技术学院讲师，感兴趣的研究方向为计算机网络。

E-mail: jwl@computer.njtu.edu.cn